京都大学	博士（工学）	氏名	鈴木　康祐
論文題目	An immersed boundary-lattice Boltzmann method for moving boundary flows and its application to flapping flight 埋め込み境界－格子ボルツマン法を用いた移動境界流れの数値計算法の開発とその羽ばたき飛翔への応用		

（論文内容の要旨）

本論文は，移動境界流れを精度良くかつ効率よく計算するための手法として，埋め込み境界－格子ボルツマン法（以下，IB-LBM）を開発・改良するとともに，開発したIB-LBMを用いて移動境界流れの重要な一例である昆虫の羽ばたき飛翔の研究を行ったものであり，7章からなっている．

本論文の第1章は全体緒言であり，移動境界流れの数値計算法に関する世の中の研究動向を示した上で，それらの数値計算手法を精度，計算コスト，アルゴリズムの簡便さの観点から評価し，IB-LBMが移動境界流れの数値計算に適した手法であることを示している．そして，従来のIB-LBMにおける解決すべき問題点（すべりなし境界条件からの誤差，境界における速度勾配の不連続，格子ボルツマン法固有の圧縮性誤差等の欠点）を述べている．

第2章では，IB-LBMの定式化を行っている．埋め込み境界法として，境界点を任意に選ぶことができて，アルゴリズムが特に容易であり，かつ境界上での滑りなし条件の精度が良いMulti Direct Forcing Methodを用いている．また，物体が受ける力やトルクを容易にかつ高精度に計算できる手法を新たに提案している．そして，様々なベンチマーク問題の数値計算を通してIB-LBMの妥当性検証を行っている．その結果，構築したIB-LBMがどのような問題でも精度よく流れ場や物体が受ける力を計算でき，汎用性・精度ともに優れた手法であることを明らかにしている．

第3章では，IB-LBMの高精度化を行っている．IB-LBMの精度が，格子ボルツマン法の本来の精度（空間2次精度）よりも低下し，1次精度になってしまう原因を，境界において速度勾配の不連続が生じてしまうことと考え，これを回避するための手法（拡張埋め込み境界法）を新たに提案している．拡張埋め込み境界法では，流速を物体内部の領域に外挿して流速場を滑らかに拡張することで，境界における速度勾配不連続を回避している．精度検証の結果，流速誤差や物体が受ける力の誤差は従来の方法の10分の1程度になり，誤差の収束性も1次精度より改善されることを明らかにしている．

第4章では，圧縮性誤差をはじめとした格子ボルツマン法固有の欠点を解決している．まず，いくつかの典型的な問題の数値計算を通して，格子ボルツマン法に基づく3つの手法（LBGK, LKS, LWACM）には (i) 散逸誤差，(ii) 圧縮性誤差，(iii) 低解像度での数値不安定性の3つの欠点があることを明らかにしている．そして，それらの欠点を解決する手法（改良LKS）を新たに提案し，格子ボルツマン法の数値計算精度および数値安定性を改善している．

京都大学	博士（工学）	氏名	鈴木　康祐

第 5 章では， 2 次元対称羽ばたきによる非対称な流れ場の誘起と揚力発生について，第 2 章で構築した IB-LBM を用いた数値計算を通して調べている．2 次元対称羽ばたき翼は，一端で接合された 2 本の線分からなる翼がその接合点回りに上下左右対称に羽ばたく単純なモデルである．まず，無重力場において，Reynolds 数（以下，Re で表す）が対称羽ばたき翼まわりの流れに及ぼす影響について調べている．その結果，$Re \lesssim 50$ では翼のまわりに上下に対称な渦対が生成されるため時間平均した揚力は発生せずに翼は平衡位置で停留するが，$Re \gtrsim 50$ では上下の対称性が崩れて時間平均した揚力が発生し翼は一方向へ運動することを明らかにしている．さらに，無重力場において，翼の羽ばたき運動の初期位相，翼の質量，羽ばたき角の振幅といった対称羽ばたき翼の運動を支配するパラメータが翼の運動に及ぼす影響を調べている．最後に，重力場における自由運動の計算を行い，重力に打ち勝ち飛翔可能となる Reynolds 数と Froude 数の領域を明らかにしている．

第 6 章では，蝶を模した 3 次元羽ばたき翼モデルを構築し，その揚力・推力の発生について，第 2 章で構築した IB-LBM を用いて調べている．この翼モデルの翼は，正方形平板からなり，胴体は一本の棒で表される単純なものであり，実際の蝶のように翼を真下に打ち下ろすことで揚力を，後方に打ち上げることで推力をそれぞれ発生させている．まず，翼モデルの胴体が固定されている場合に発生する揚力・推力を $50 \leqq Re \leqq 1000$ の範囲で計算している．また，その揚力によって支持可能となる質量を見積もっている．次に，翼モデルの胴体が並進運動する場合の計算を行い，重力に打ち勝ち飛翔可能となる Reynolds 数と質量の関係を明らかにしている．さらに，単純な翼モデルにもかかわらず，実際の昆虫の条件（羽ばたき周期および質量を実際と合わせた条件）でも重力に打ち勝ち飛翔できることを示している．最後に，翼モデルの胴体が並進だけでなく回転もする場合の計算を行い，ピッチング角の増加によって翼モデルは姿勢を崩し，安定して飛翔できなくなるものの，実際の蝶のように胴体を折り曲げることによって，ピッチング角の増加を抑え姿勢を崩すことなく継続的に飛翔できることを示している．

第 7 章では，本論文を総括するとともに今後の課題について述べている．